

전달함수를 이용한 저파수 영역에서의 센서 유입 소음 특성 연구

박 지 혜* · 이 종 길** · 신 구 균*** · 조 치 영***

<국문초록>

배열센서에 영향을 주는 자체소음은 그 시스템이 설치된 곳에서 발생하는 소음과 해양으로부터 들어오는 주변소음을 포함한 소음으로 정의된다. 수중에서의 탐지를 위한 배열 구조는 표면을 따라 발생하는 유체 유기소음에 많은 영향을 받는다. 본 논문에서는 곡면배열 음향 센서를 설계하기 위하여 유동유기 소음의 영향으로 인한 주파수 밀도 함수의 적분식의 주요 구성요소인 전달함수(transfer function)를 저파수 영역에서 수치해석 하였다. 난류 경계층에서 발생하는 유입 소음은 수정된 Corcos 모델을 이용하였다. 저파수 영역에서의 전달함수의 특성은 고정관의 두께와 밀도가 작아질수록 함수의 적분값은 적어지므로 소음의 영향은 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 Corcos 벽면 압력과 전달함수의 곱에 따른 특성과 주파수 밀도 함수의 곱의 변화를 보였다. 향후 이러한 연구는 무인 잠수정에 탑재할 수 있는 곡면배열 센서의 설계에 응용이 가능하리라 판단된다.

주제어: 전달 함수, 저파수 영역, 하이드로폰, 유입 소음, 주파수 밀도 함수

* 안동대학교 대학원 정밀기계공학과 석사과정

** 교신저자 : 이종길(jlee@andong.ac.kr), 안동대학교 사범대학 기계교육과 교수

*** 국방과학연구소 제6연구개발본부 책임연구원

I. 서론

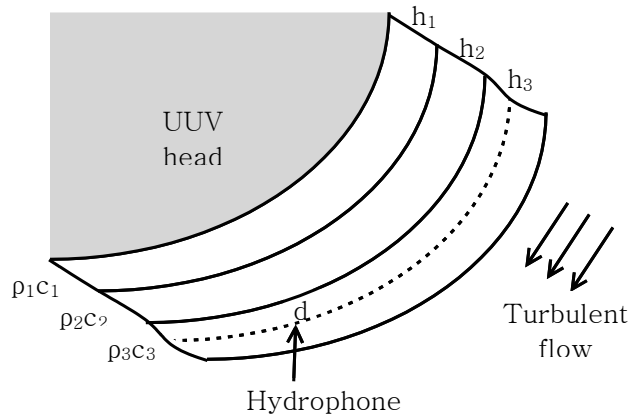
1. 연구의 필요성

수중에서의 잠수함 음향 탐지는 소리에 의존하기 때문에 소음은 표적탐지 성능을 저하시키고 기능에 치명적인 역할을 한다 무인잠수정(UUV, Unmanned Underwater Vehicle)이 정지하거나 저속으로 운항할 경우 자체소음은 일반적으로 무시할만 하지만 난류 유동이 형성되는 수중에서 작동하므로 유체 유기 소음은 큰 문제가 된다

센서가 UUV 몸체의 곡면과 같은 반경으로 휘어져 부착되는 곡면 배열(conformal array) 음향센서는 무인잠수정의 선수부나 선체 중앙에 장착되어 최근에 많이 사용되고 있다(Freitag et. al. , 2001). 플랫폼에서 별도의 돌출된 구조물 없이 외부에 직접 장착되어 운용되는 수중통신용 곡면배열 음향센서를 개발하기 위해 이에 대한 연구가 필수적으로 요구된다(Benjamin, 2001). 유체의 난류 유동으로 인한 소음은 UUV를 움직이는데 피할 수 없는 부산물이므로 곡면 배열 센서에 소음의 유입을 최소화할 수 있는 배열구조에 대한 연구가 필요하다

2. 연구의 목적

[그림 1]은 뒤판이 탄성층을 지지하며 탄성층 내에 센서가 묻혀 있는 3-Layer 구조이다. 난류에 의한 유동 유기 소음이 수중 음향센서에 유입됨을 볼 수 있는 구조이다. Layer의 두께와 재질, 탄성계수, 밀도에 따라 전달함수가 달라질 것이다. 더불어 유입



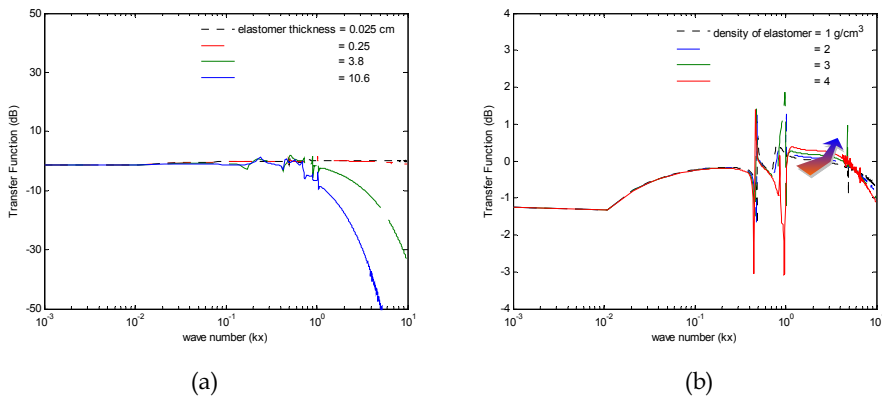
[그림 1] 탄성층 내에 하이드로폰이 삽입된 3-Layer 설치 구조

되는 소음의 정도 역시 달라질 것이며 주파수에 따라서도 소음 유입량을 최소화 할 수 있다(S. Ko and et. al., 2001).

파수 약 1 이하의 저주파 영역에서와는 달리 파수 kx 의 값이 1이상의 영역에서 수치해석 한 결과는 무시할 수 있을만큼 그 변화가 미미하였으며 뚜렷한 경향성을 나타내지 않았다. 그리하여 본 연구는 [그림 1]에 제시된 고정판의 두께와 밀도에 따른 전달함수의 변화를 저주파 영역에서 수치해석 하는 것이며, 주파수 밀도 함수의 Corcos 벽면 압력과 전달함수의 곱에 따른 변화를 살펴보는 것을 목적으로 한다. 전달함수를 이용하여 저주파(kx 의 값이 약 0.001~1)에서의 센서 유입 소음에 대한 특성을 파악하고 장차 곡면 배열에 대한 연구에 대한 자료를 제공하고자 한다.

3. 선행 연구 조사

이중 적분식인 주파수 밀도 함수는 $P(kx, ky)$, $S(kx, ky)$, $A(kx, ky)$, $T(kx, ky)$ 의 함수를 포함한다. 전달함수 T 의 크기가 클수록 적분 면적은 커지며 동시에 $Q(\omega)$ 의 값도 커진다. $Q(\omega)$ 의 감소는 소음 저감으로 이어진다. 전달함수와 난류벽면압력 주파수 스펙트럼 함수의 곱을 계산하여 소음 저감효과를 예측하였다(박지혜 외, 2008).



[그림 2] 탄성층의 두께와 밀도에 따른 전달함수의 변화: (a) 탄성층의 두께에 따른 전달함수의 변화, (b) 탄성층 재료의 밀도에 따른 전달함수의 변화(박지혜 외, 2008)

탄성층의 두께, 밀도, 탄성계수 등의 물리적 변화에 따른 수치해석 결과를 보인 것이다. [그림 2]의 (a)에는 탄성층의 두께가 0.025cm~10.6cm로 임의로 변화하였을 때 전달함수의 변화를 본 것이다. 두께가 두꺼울수록 소음 저감효과가 커짐을 알 수 있다. (b)에서는 주로 파수 kx 의 값이 1~10 사이에서 탄성층 재료의 밀도가 증가할수록 전달함수

값은 증가하여 주파수 밀도 함수의 적분값을 증가시키는 요인이 되었다 이는 탄성층 재질의 밀도 증가에 소음 저감에 도움이 되지 않음을 보여주었다(박지혜 외, 2008).

II. 주파수 밀도 함수와 전달 함수

UUV 선체 표면 주위에 선체속도, 형상, 돔 표면의 상태, 배열 주위의 음향 원도우와 관련되어 유기된 압력 변동은 돔의 구조물에 진동을 발생시킨다(Benjamin, 2001). [그림 1]의 경우와 같이 센서가 묻혀 있는 경우에 난류 유동 벽면 압력으로 인한 센서의 주파수 스펙트럼 밀도 함수(frequency spectral density function), $Q(\omega)$ 는 다음의 식 (1)과 같이 표현된다(Montgomery, 1993, Corcos, 1963).

$$Q(\omega) = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(k_x, k_y, \omega) \times S(k_x, k_y) \times A(k_x, k_y) T(k_x, k_y, \omega) dk_x dk_y \quad (1)$$

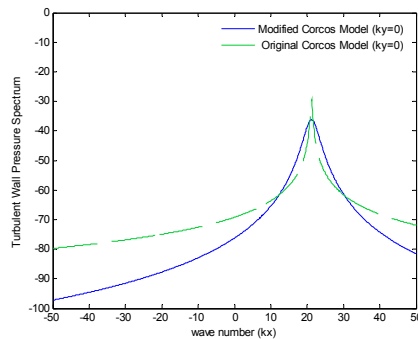
여기서, $P(k_x, k_y, \omega)$ 는 Corcos 난류 벽면 압력(Corcos turbulent wall pressure), $S(k_x, k_y)$ 는 형상 함수, $A(k_x, k_y)$ 는 배열 함수, $T(k_x, k_y, \omega)$ 는 전달 함수이다. k_x 및 k_y 는 각각 x 방향 및 y 방향으로의 파수(wave number)이다. 식 (4)에서의 A_1, A_2, B_1, B_2 는 미지의 계수이다(S. Ko and et. al., 2001).

$$P(k_x, k_y, \omega) = a_o \rho^2 v_*^4 / \omega \times \frac{a_1 a_2 k_c^2}{\pi^2 [(k_x - k_c)^2 + (a_1 k_c)^2] [k_y^2 + (a_2 k_c)^2]} \quad (2)$$

$$P'(k_x, k_y, \omega) = \frac{a_o \rho^2 v_*^4}{\omega \pi^2} \times \left\{ \frac{c_2 k_c}{k_y^2 + (c_2 k_c)^2} \times \frac{2 (c_1 k_c)^3}{[(k_x - k_c)^2 + (c_1 k_c)^2]^2} \right\} \quad (3)$$

$$T_{zz}(k_x, z) = [\rho_1 c_{s1}^2 (k_x^2 - \beta_1^2) \cos(a_1 z)] A_1 + [\rho_1 c_{s1}^2 (k_x^2 - \beta_1^2) \sin(a_1 z)] B_1 + [2i \rho_1 c_{s1}^2 k_x \beta_1 \sin(\beta_1 z)] A_2 + [-2i \rho_1 c_{s1}^2 k_x \beta_1 \cos(\beta_1 z)] B_2 \quad (4)$$

Corcos 난류 벽면 압력 $P(k_x, k_y, \omega)$ 에서 원래의 Corcos(Original Corcos Model) 모델은 식 (2)와 같고, 수정된 Corcos(Modified Corcos Model) 모델은 식 (3)과 같다. [그림 3]은 $k_y=0$ 일 때 원래의 Corcos 모델과 수정된 Corcos 모델을 비교하여 수치 해석한 결과이다. 수정된 Corcos 모델의 벽면 압력이 낮은 것으로 보아 $Q(\omega)$ 의 적분값을 낮추기 위해서는 수정된 Corcos 모델을 적용하는 것이 좀더 유리할 것이라 판단된다.



[그림 3] Original Corcos 모델과 Modified Corcos의 비교(이종길, 박지혜, 2007)

III. 외부 유입 소음 영향 해석 및 결과

식 (2)에 제시된 주파수 밀도 함수는 $P(k_x, k_y)$, $S(k_x, k_y)$, $A(k_x, k_y)$, $T(k_x, k_y)$ 의 함수를 알아야 풀 수 있는 이중 적분식이다. 그러나 이중 적분의 특성에서 알 수 있듯이 전달함수 T 의 크기가 클수록 적분 면적은 커지며 따라서 $Q(\omega)$ 값 역시 커진다. 소음 저감은 $Q(\omega)$ 값의 감소를 의미한다. 본 수치해석에서는 식 (1)을 전체 이중 적분

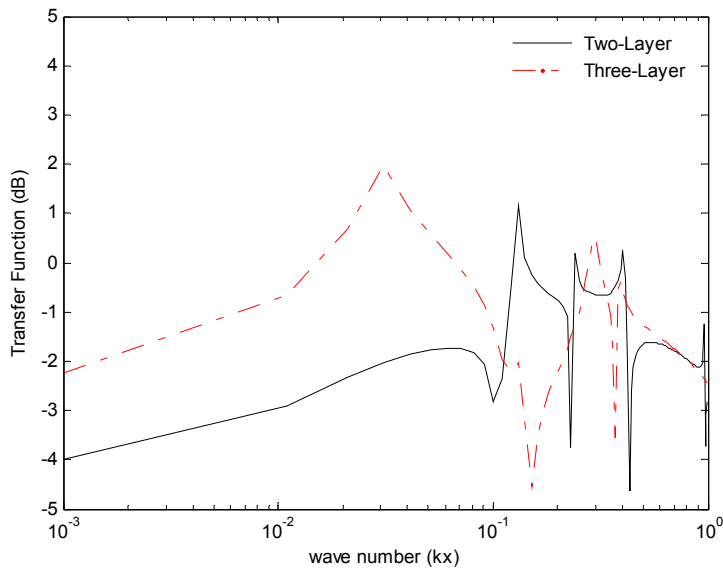
<표 1> 2-Layer, 3-Layer의 물성치

Parameters	Two-Layer	Three-Layer
h	$h_1=5.08\text{cm}$ $h_2=5.08\text{cm}$	$h_1=5.08\text{cm}$ $h_2=5.08\text{cm}$ $h_3=5.08\text{cm}$
ρ	$\rho_1=1.0\text{g/cm}^3$ $\rho_2=1.2\text{g/m}^3$	$\rho_1=1.0\text{g/cm}^3$ $\rho_2=1.2\text{g/cm}^3$ $\rho_3=7.8\text{g/m}^3$
d	1.25cm	1.25cm

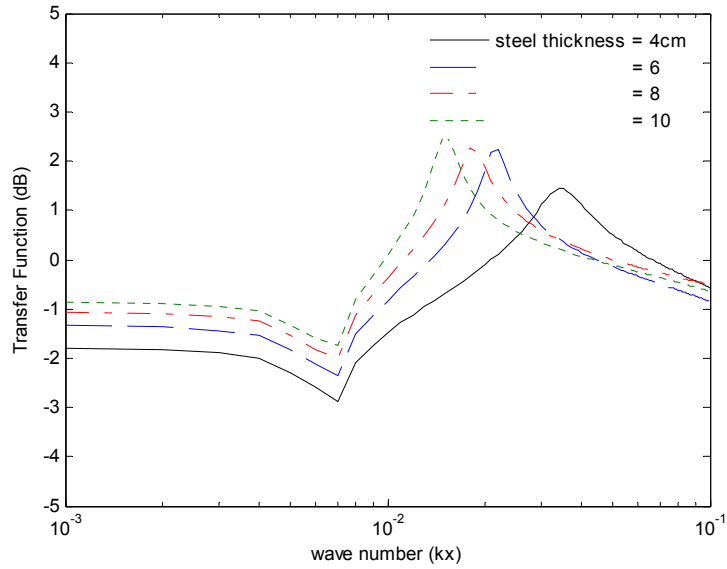
하는 복잡한 방법을 피하고 전달함수 $T(k_x, k_y)$, 난류 벽면압력 주파수 스펙트럼 함수 $P(k_x, k_y, \omega)$ 의 곱을 계산하여 소음 저감효과를 예측하였다.

[그림 4]는 2-Layer, 3-Layer 일 때의 수치해석 결과를 보인 것이다 식(4)에 대입한 값들은 <표 1>에 정리하였다. 먼저 [그림 4]에는 파수 k_x 의 값이 0.001~1인 저파수 영역에서 전달함수의 변화량이다. 약 파수 0.1보다 낮은 영역에서 3-Layer 보다 2-Layer 일 때 전달함수의 적분값이 감소하며 이러한 경향은 외부 유입 소음 저감에 더 유리함을 보여준다.

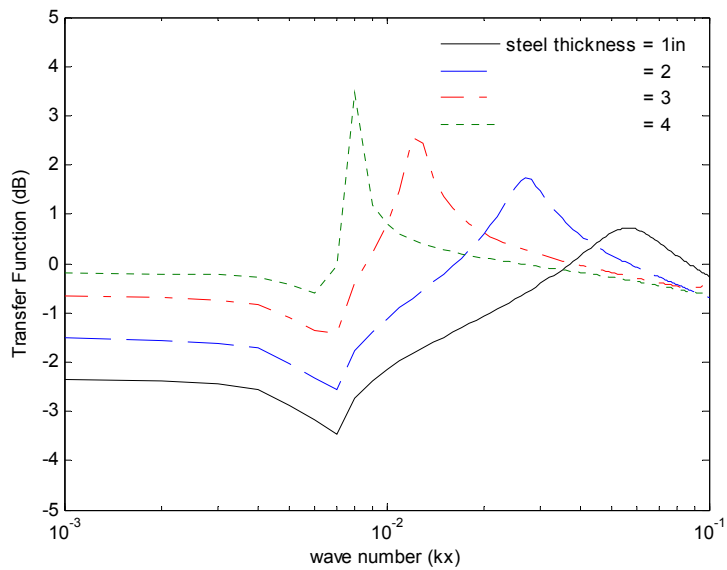
[그림 5]에는 파수 k_x 의 값이 0.001~0.1 범위에서 고정판의 두께에 따른 전달함수의 변화를 보인 것이다. 고정판의 두께가 두꺼울수록 전달함수의 적분값이 증가하므로, 고정판의 두께가 얇을수록 소음 저감효과가 커짐을 알 수 있다. [그림 6]은 고정판의 두께를 inch단위로 일정한격 변화시켜 전달함수의 크기를 보았는데 1in간격의 변화에서도 [그림 5]와 동일한 결과를 얻었다. 고정판의 두께는 음파를 반사시키는 효과도 있지만 외부 유입소음을 감소시키는 역할도 할 수 있음을 확인하였다.



[그림 4] 2-Layer, 3-Layer의 파수 $k_x(0.001\sim 1)$ 에 따른 변화량



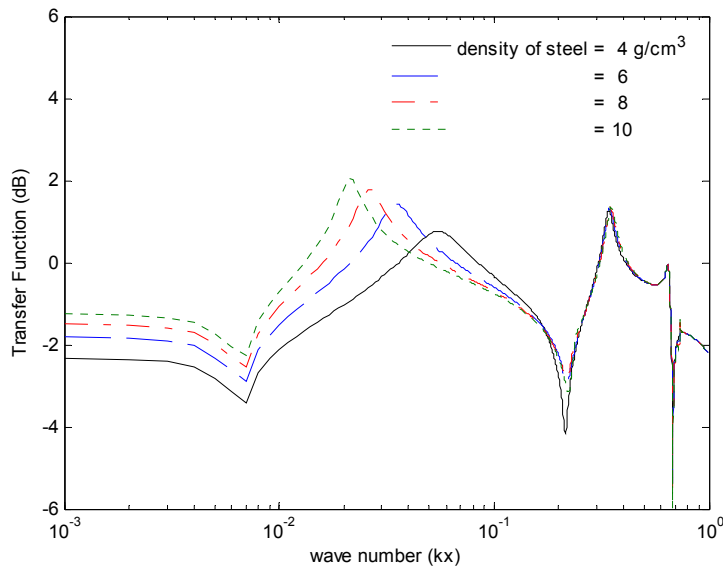
[그림 5] 고정판의 두께에 따른 전달함수의 변화(4cm~10cm)



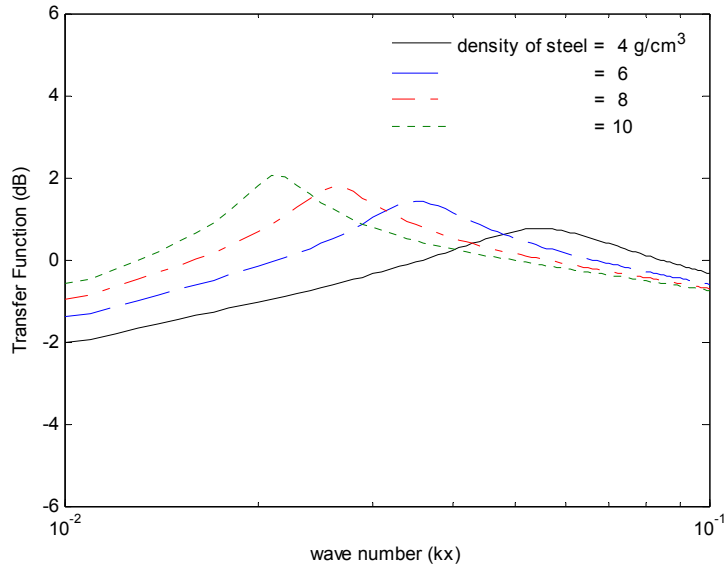
[그림 6] 고정판의 두께에 따른 전달함수의 변화(1in~4in)

탄성층의 재료는 엘라스토머이며, 고정판의 재질은 스틸이므로 [그림 7]에는 탄성층의 밀도값을 각각 $\rho_1=1.2\text{g/cm}^3$, $\rho_2=0.8\text{g/cm}^3$ 로 고정하고 고정판 재질의 밀도 변화($\rho_3=4\text{g/cm}^3\sim 10\text{g/cm}^3$)에 따른 전달함수의 변화를 나타낸 것이다. 주로 파수 kx 의 값이 0.1 이하의 영역에서 고정판 재질의 밀도가 증가할수록 전달함수 값은 증가하여 주파수 밀도 함수의 적분값을 증가시키는 요인이 되었다 이는 고정판 재질의 밀도 증가는 외부 유입 소음 저감에 도움이 되지 않음을 보여주는 것이다. 그러나 파수 kx 의 값이 약 0.1~1 범위에서는 고정판의 밀도변화가 전달함수에 영향을 거의 미치지 않음을 알 수 있었다. 뚜렷한 변화를 보이는 영역(kx 값이 0.01~0.1)에서 같은 방법으로 [그림 8]에는 탄성층의 밀도 $\rho_1=1.2\text{g/cm}^3$, $\rho_2=0.8\text{g/cm}^3$ 로 고정하여 파수 kx 의 값이 0.01~0.1 범위에서의 전달함수의 변화이다. 고정판 재질의 밀도가 증가할수록 주파수 밀도 함수의 적분값을 증가시킴으로써 [그림 7]과 동일한 결과를 얻었다.

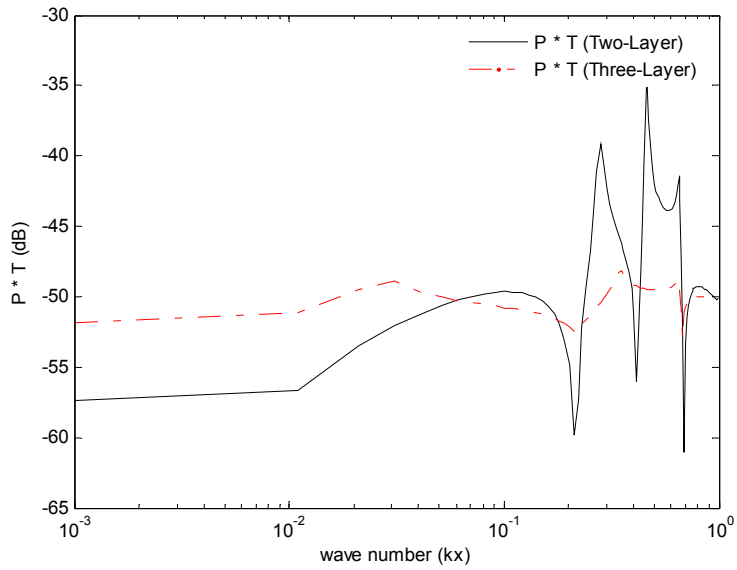
[그림 9]에는 일정한 벽면 주파수를 가진 Corcos 모델에서 $P(kx, ky, \omega)*T(kx, ky)$ 의 형상을 보인 것이다. 2-Layer 일 때의 전달함수와 3-Layer 일 때의 전달함수를 Corcos 벽면 압력에 곱한 것인데, 2-Layer 에 비하여 평탄한 주파수 응답 특성을 보인다. 곡면 배열 최적 설계시 이러한 특성을 반영하여 설계하면 더 유리할 것이라 사료된다 [그림 10]은 파수 kx 의 값이 0.1~1 범위에서 살펴본 것이며 [그림 9]과 동일한 결과를 얻었다.



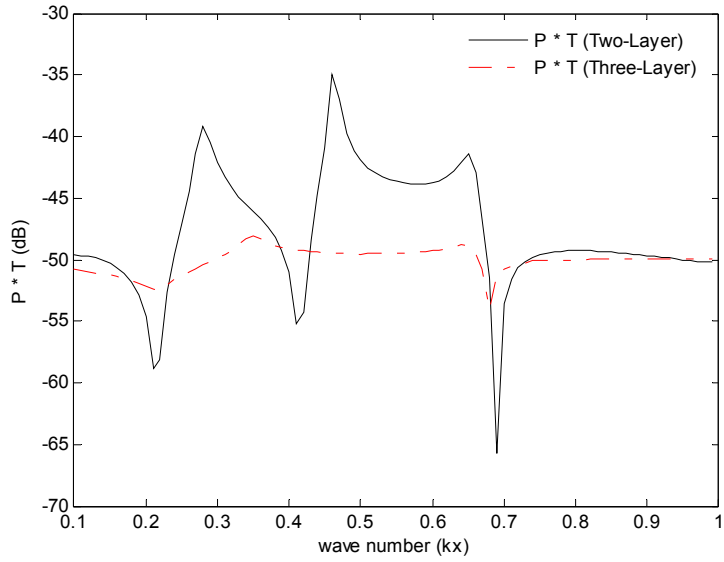
[그림 7] 고정판 재질의 밀도 변화에 따른 전달함수의 변화($kx=0.001\sim 1$)



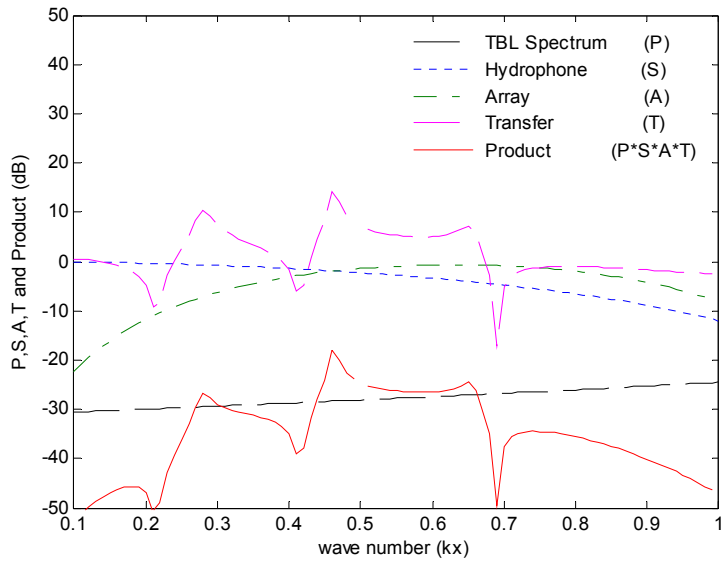
[그림 8] 고정판 재질의 밀도 변화에 따른 전달함수의 변화($kx=0.01\sim 0.1$)



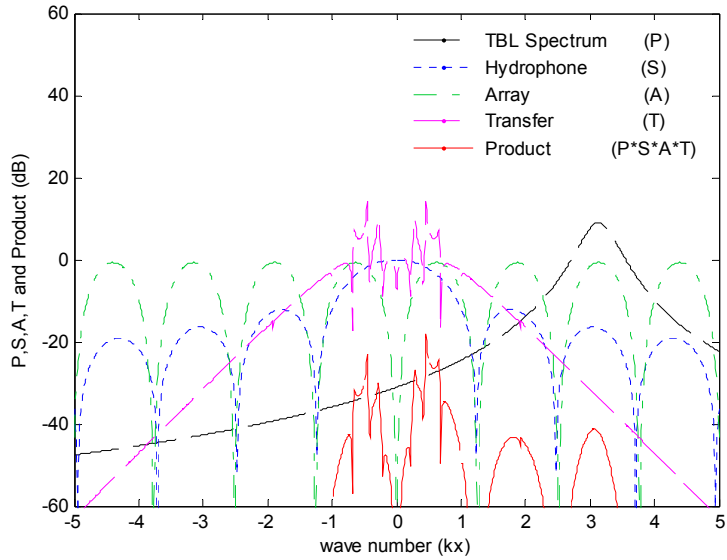
[그림 9] Corcos 벽면 압력과 전달함수의 곱의 파수에 따른 변화량($kx=0.001\sim 1$)



[그림 10] Corcos 벽면 압력과 전달함수의 곱의 파수에 따른 변화량(kx=0.1~1)



[그림 11] Corcos 벽면 압력과 하이드로폰 함수, 배열 함수, 전달 함수의 곱에 따른 변화량



[그림 12] $-5 < kx < 5$ 의 범위에서 벽면압력, 하이드로폰함수, 전달함수, 배열함수의 곱에 따른 변화량

[그림 11]에는 식 (1)의 주파수 밀도 함수에서 Corcos 난류벽면 압력, 하이드로폰 함수, 배열 함수, 전달함수를 곱하여 저파수 영역에서 살펴본 것이다. 곡면 배열 최적 설계시 이 함수들을 곱한 값이 최소치가 되는 값을 최적치로 선정하면유입소음을 최소화 시키는데 유리할 것으로 사료된다. [그림 12]에는 파수가 $-5 < kx < 5$ 의 범위에서 벽면압력, 하이드로폰함수, 전달함수, 배열함수의 곱에 따른 변화량을 보였다. [그림 11]과 비교하여 저파수에서는 변화량이 심하나 고파수에서는 변화량이 미미함을 알 수 있다.

IV. 요약 및 결론

곡면배열 센서를 설계하는데 유동유기 소음의 영향은 매우 중요한 문제이며 저감시키는 요인을 연구하는 것은 매우 필요하다 본 논문에서는 탄성층에 삽입된 하이드로폰이 저파수 영역에서의 외부 유입 소음의 영향을 해석하였다. 주파수 밀도 함수의 적분식의 주요 구성요소인 Corcos 벽면 압력과 전달함수를 수치해석 하였다. 소음 저감을 위한 변수로는 고정판의 두께 밀도 등을 선정하여 수치해석 하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 주로 파수 0.1 이하의 영역에서 3-Layer 보다 2-Layer 일 때 전달함수의 적분값이 감소하여 외부 유입 소음 저감에 더 유리함을 알 수 있었다.

둘째, 고정판의 두께를 4cm~10cm로 변화시키면서 전달함수를 관찰하였으며 같은 방법으로 고정판의 두께를 1in~4in에서 일정 간격으로 증가시켜 전달함수의 크기를 보았는데, 파수가 0.1 이하의 저파수 영역에서 고정판의 두께가 얇을수록 적분값을 감소시켜 소음 저감효과가 커짐을 알 수 있었다.

셋째, 탄성층의 밀도를 각각 $\rho_1=1.2\text{g/cm}^3$, $\rho_2=0.8\text{g/cm}^3$ 로 고정하고 고정판 재료의 밀도 변화($\rho_3=4\text{g/cm}^3\sim 10\text{g/cm}^3$)에 따른 전달함수의 변화를 수치 해석 한 결과 파수 kx 의 값이 약 0.1 이하의 영역에서는 고정판 재료의 밀도가 증가할수록 전달함수 값은 증가하여 주파수 밀도 함수의 적분값을 증가시켰으며, 파수 kx 의 값이 약 0.1~1 범위에서는 고정판의 밀도변화가 전달함수에 영향을 거의 미치지 않음을 알 수 있었다.

넷째, 파수 1 이하의 저파수 영역에서 2-Layer, 3-Layer 일 때의 각각의 전달함수를 Corcos 벽면 압력과 각각 곱한 결과 2-Layer 에 비하여 3-Layer 일 때 평탄한 주파수 응답 특성을 보였다. 이와 같은 결과는 탄성층에 삽입된 음향 하이드로폰의 배열 구조를 최적 설계하는데 이러한 인자들의 특성을 활용할 수 있을 것이다

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다. 계약번호(UD070054AD)

참고 문헌

- 박지혜 외(2008). 탄성층에 삽입된 음향 하이드로폰의 외부 유입소음 영향 연구. **대한공업교육학회논문집**, 33(2), 273-286.
- 이종길, 박지혜(2007). 유동 유기 소음으로 인한 주파수 밀도 함수의 변화의 수치해석 연구. **과학교육연구논문집**, 10, 147-153.
- Benjamin, K.(2002). Recent advances in 1-3 piezoelectric polymer composite transducer technology for AUV/UUV acoustic imaging applications. *Journal of Electroceramics*, 8, 145-154.
- Corcos, G. M.(1963). The structure of the turbulent pressure field in boundary layer. *Journal of Acoustical Society of America*, 35(2) 353-378.
- Freitag et al.(2001). Acoustic communication with small UUVs using a hull-mounted conformal array. *Proceedings of Oceans*, 2270~2275.
- Montgomery, R.(1993). An analytical model for turbulence-induced flexural noise in large conformal sonar arrays. NRL-7175 Report.
- Sung-Hwan Ko, Sangwoo Pyo, Woojae Seong(2001). Structure-borne and flow noise reductions. Seoul National University Press.

<Abstract>

Inflow Noise Characteristics of the Sensor in Low Wave Number Region Using Transfer Function

Ji-hye Park* · Jongkil Lee* · Ku-kyun Shin*** · Chi-yong Cho***

The noise itself that affects the sensor array is defined as the noise which happens in the place where the system is installed and the circumference noise which comes from the ocean. The array structure for detecting acoustic signal in the underwater effected turbulent layer flow noise. In this paper to design the conformal array spectral density function was introduced and several cases of flow induced noise which affect transfer function were simulated. Modified Corcos wall pressure model was used as turbulent boundary layer flow noise. The effect of noise has been reduced as integrated sum of transfer function has been reduced by decreasing elastomer thickness and density when kx is in low wave number area. Also the characteristics of transfer function by Corcos wall pressure displayed the product of frequency density function. This simulation results can be applied to the conformal array design in unmaned underwater vehicle in the near future.

Key words: Transfer function, Low wave number, Hydrophone, Inflow noise, Frequency density function

* Department of Precision Mechanical Engineering, Graduate School, Andong National University

** Correspondence : jlee@andong.ac.kr, Professor of Mechanical Engineering Education, College of Education, Andong National University

*** Agency for Defense Development